

Определение направления на местную вертикаль для наноспутника класса CubeSat по анализу изображений Земли

© И.А. Ломака, Е.В. Устюгов

СНИУ им. академика С.П. Королёва, Самара, 443086, Россия

Рассмотрено применение видеоизображений для определения местной вертикали наноспутника. Разработаны алгоритмы решения поставленных задач. Представлены основные формулы, результат численного эксперимента. Приведены выводы об области применения систем.

Ключевые слова: наноспутник, местная вертикаль, видеонавигация, модель движения, ориентация.

Введение. Видеонавигацию начали применять с конца 1960-х годов. Наибольшее распространение получили оптические построители местной вертикали (ПМВ), работа которых основана на «визировании» видимого горизонта планеты как минимум в трех его различных точках при наличии теплового контраста между поверхностью планеты и «холодным» космическим пространством. Поэтому их также называют инфракрасными (ИК) ПМВ или ИК-вертикалями (ИКВ) [1].

Возможны различные варианты реализации просмотра ИК-горизонта планеты. В основном просмотр осуществляется путем кругового сканирования края горизонта планеты угловым полем построителя. При работе такой ИКВ ее оптическая ось за счет вращения зеркала с некоторой угловой скоростью описывает коническую поверхность, ось которой совпадает с осью космического аппарата (КА). Тем самым обеспечивается круговой просмотр ИК-горизонта планеты, а воспринимаемое прибором излучение содержит информацию об отклонении ориентируемой оси КА от направления МВ.

Такие ПМВ используются на тяжелых КА с достаточной энергетикой. Если рассматривать малые космические аппараты (МКА), в частности наноспутник, то применение в нем ИК-камеры и тем более вращающего зеркала не рационально, так как энергетика такого спутника чрезвычайно ограничена. При вращении зеркала создается возмущающий момент, который будет вращать МКА. Масса и габариты такой системы достаточно велики.

Если легкая оптическая система с малыми габаритами и энергопотреблением, не имеющая подвижных частей, сможет обеспечить определение ориентации МКА с заданной точностью и в широком диапазоне начальных углов ориентации, угловых скоростей и высот,

то ее можно использовать как основную систему определения угловой ориентации МКА.

Определение направления на МВ по анализу изображений Земли. Для определения направления на МВ предлагается использовать изображения (рис. 1) с двух видеокамер 1, расположенных на гранях наноспутника так, что их оси визирования 2 взаимно перпендикулярны.

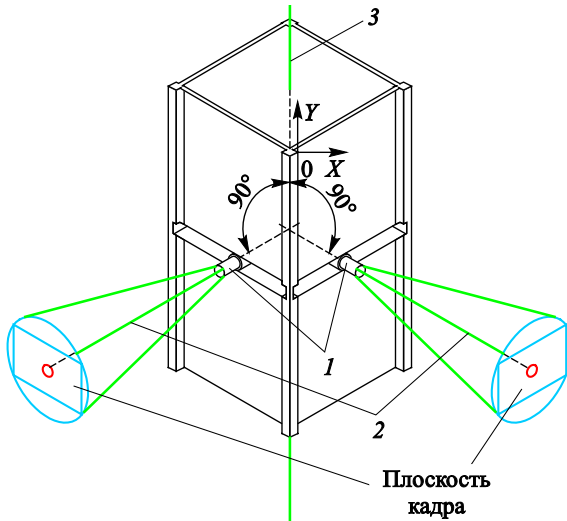


Рис. 1. Схема расположения видеокамер:

1 — видеокамеры; 2 — ось визирования; 3 — продольная ось

Для определения отклонения продольной оси наноспутника от МВ на изображении, полученном с видеокамеры, с помощью детектора границ Канны выделяют линию горизонта Земли [2]. Крайние точки дуги являются точками начала и конца вектора (рис. 2), перпендикулярного к плоскости, проходящей через центр Земли и центр масс наноспутника. Аналогичные построения проводятся и на изображении, полученном от второй видеокамеры. Векторное произведение двух векторов дает вектор направления на центр Земли в связанной с наноспутником системе координат.

Определение области применимости системы. Решим следующую задачу. Имея видеокамеру, жестко закрепленную на КА с известными характеристиками, и зная ее ориентацию и положение относительно Земли, определить видимость горизонта Земли. Пусть видеокамера находится в точке A с координатами $(0, 0, R + H)$, как показано на рис. 3, где H — высота над поверхностью Земли, R — радиус Земли. Вектор оси визирования видеокамеры \vec{n}_k имеет координаты (n_{kx}, n_{ky}, n_{kz}) . Угол полураствора видеокамеры α , соотношение сторон кадра $3/4$. Поле обзора видеокамеры в пространстве представля-

ет собой пирамиду, грани которой проходят через точку A и определяются векторами $\vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_3, \vec{n}_4$. Основание пирамиды определяется плоскостью, проходящей через точку K касания сферы вектором \vec{n}_p .

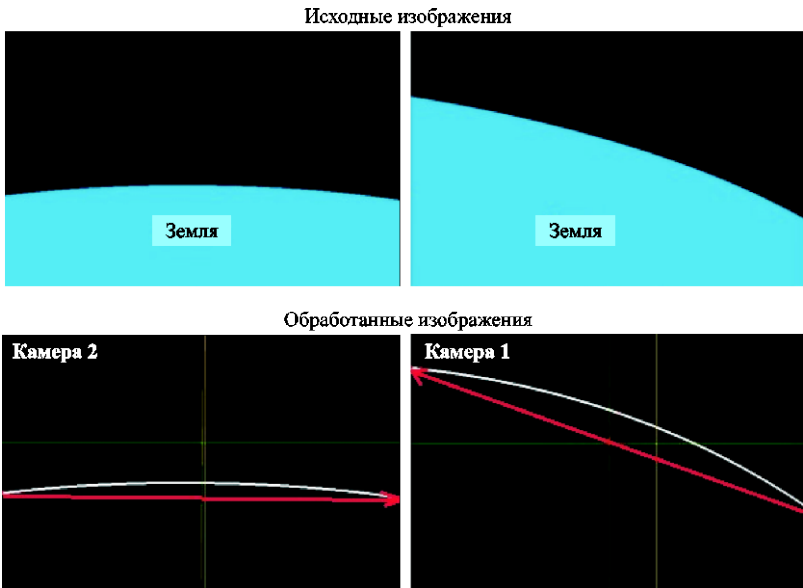


Рис. 2. Результаты обработки и анализа изображений

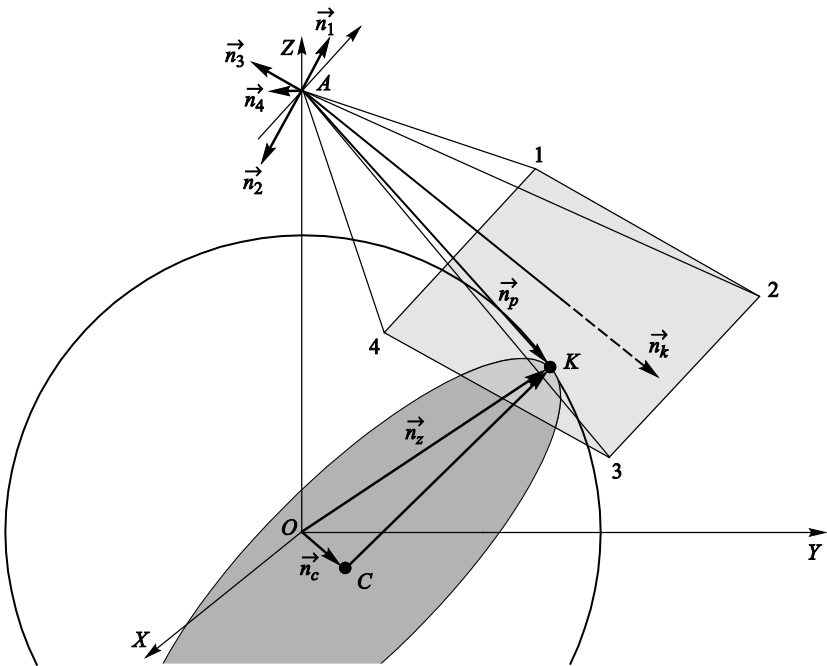


Рис. 3. Положение видеокамеры в пространстве

Координаты точки касания K определим, решив систему линейных уравнений

$$\begin{aligned} v_x K_x + v_y K_y + v_z K_z &= 0; \\ n_{z_x} K_x + n_{z_y} K_y + n_{z_z} K_z &= (R + H) n_{z_z}; \\ n_{k_x} K_x + n_{k_y} K_y + n_{k_z} K_z &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\vec{v} = \vec{n}_z \times \vec{n}_p$.

Сечение сферы плоскостью кадра 1–2–3–4 представляет собой окружность с центром в точке C , координаты которого определим из решения системы линейных уравнений:

$$\begin{aligned} v_x C_x + v_y C_y + v_z C_z &= 0; \\ n_{r_x} C_x + n_{r_y} C_y + n_{r_z} C_z &= 0; \\ n_{k_x} C_x + n_{k_y} C_y + n_{k_z} C_z &= n_{k_x} K_x + n_{k_y} K_y + n_{k_z} K_z. \end{aligned} \quad (2)$$

Вычислим координаты крайних точек кадра 1–4 соответственно решением систем линейных уравнений:

$$\begin{aligned} n_{1_x} X_1 + n_{1_y} Y_1 + n_{1_z} Z_1 &= n_{1_z} (R + H); \\ n_{3_x} X_1 + n_{3_y} Y_1 + n_{3_z} Z_1 &= n_{3_z} (R + H); \\ n_{k_x} X_1 + n_{k_y} Y_1 + n_{k_z} Z_1 &= n_{k_x} C_x + n_{k_y} C_y + n_{k_z} C_z; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} n_{1_x} X_2 + n_{1_y} Y_2 + n_{1_z} Z_2 &= n_{1_z} (R + H); \\ n_{4_x} X_2 + n_{4_y} Y_2 + n_{4_z} Z_2 &= n_{4_z} (R + H); \\ n_{k_x} X_2 + n_{k_y} Y_2 + n_{k_z} Z_2 &= n_{k_x} C_x + n_{k_y} C_y + n_{k_z} C_z; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} n_{2_x} X_3 + n_{2_y} Y_3 + n_{2_z} Z_3 &= n_{2_z} (R + H); \\ n_{4_x} X_3 + n_{4_y} Y_3 + n_{4_z} Z_3 &= n_{4_z} (R + H); \\ n_{k_x} X_3 + n_{k_y} Y_3 + n_{k_z} Z_3 &= n_{k_x} C_x + n_{k_y} C_y + n_{k_z} C_z; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} n_{2_x} X_4 + n_{2_y} Y_4 + n_{2_z} Z_4 &= n_{2_z} (R + H); \\ n_{3_x} X_4 + n_{3_y} Y_4 + n_{3_z} Z_4 &= n_{3_z} (R + H); \\ n_{k_x} X_4 + n_{k_y} Y_4 + n_{k_z} Z_4 &= n_{k_x} C_x + n_{k_y} C_y + n_{k_z} C_z. \end{aligned} \quad (6)$$

Определим радиус сечения сферы плоскостью кадра по формуле

$$R_{\text{сеч}} = \sqrt{(K_x - C_x)^2 + (K_y - C_y)^2 + (K_z - C_z)^2}. \quad (7)$$

Зададим окружность в пространстве, зная ее радиус и координаты центра согласно системе уравнений

$$\begin{aligned}
 X_o &= C_x + \frac{R_{\text{сеч}}}{\sqrt{n_{kx}^2 + n_{kz}^2}} \left(n_{kz} \cos t - \frac{n_{kx} n_{ky} \sin(t)}{\sqrt{n_{kx}^2 + n_{ky}^2 + n_{kz}^2}} \right); \\
 Y_o &= C_y + \frac{R_{\text{сеч}} \sqrt{n_{kx}^2 + n_{kz}^2}}{\sqrt{n_{kx}^2 + n_{ky}^2 + n_{kz}^2}} \sin t; \\
 Z_o &= C_z - \frac{R_{\text{сеч}}}{\sqrt{n_{kx}^2 + n_{kz}^2}} \left(n_{kx} \cos t + \frac{n_{kz} n_{ky} \sin(t)}{\sqrt{n_{kx}^2 + n_{ky}^2 + n_{kz}^2}} \right),
 \end{aligned} \tag{8}$$

где $t \in [0; 2\pi]$.

Зная координаты точек окружности и координаты крайних точек кадра, определим принадлежность точек окружности прямоугольнику кадра. Если точка попадает в кадр, то это означает, что камера ее видит. Определим попадание произвольной точки окружности T с координатами (T_x, T_y, T_z) в прямоугольник с вершинами 1–4 (координаты вершин известны). Построим векторы из точки T в вершины прямоугольника. Точка T будет принадлежать прямоугольнику, если сумма площадей треугольников $T12$, $T23$, $T34$ и $T41$ равна площади прямоугольника 1234 (рис. 4).

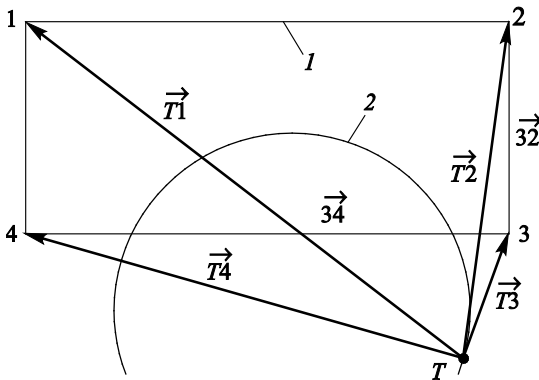


Рис. 4. К определению принадлежности точки T прямоугольнику кадра:
 1 — граница кадра; 2 — дуга горизонта

Площади треугольников определим по следующим формулам:

$$S_{T12} = 0,5 |\vec{T1} \times \vec{T2}|; \tag{9}$$

$$S_{T23} = 0,5 |\vec{T2} \times \vec{T3}|; \tag{10}$$

$$S_{T34} = 0,5 \left| \overline{T3} \times \overline{T4} \right|; \quad (11)$$

$$S_{T41} = 0,5 \left| \overline{T4} \times \overline{T1} \right|, \quad (12)$$

площадь прямоугольника по формуле

$$S_{1234} = \left| \overline{32} \times \overline{34} \right|. \quad (13)$$

Таким образом исследуем все точки окружности на принадлежность кадру.

После умножения векторов $\vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_3, \vec{n}_4, \vec{n}_k, \vec{n}_p, \vec{n}_z, \vec{n}_c$ на матрицу поворота и проверки всех точек сечения на принадлежность кадру можно сделать вывод о видимости горизонта, а значит, и о принципиальной возможности решить задачу навигации при данной ориентации. Результаты моделирования приведены на рис. 5.

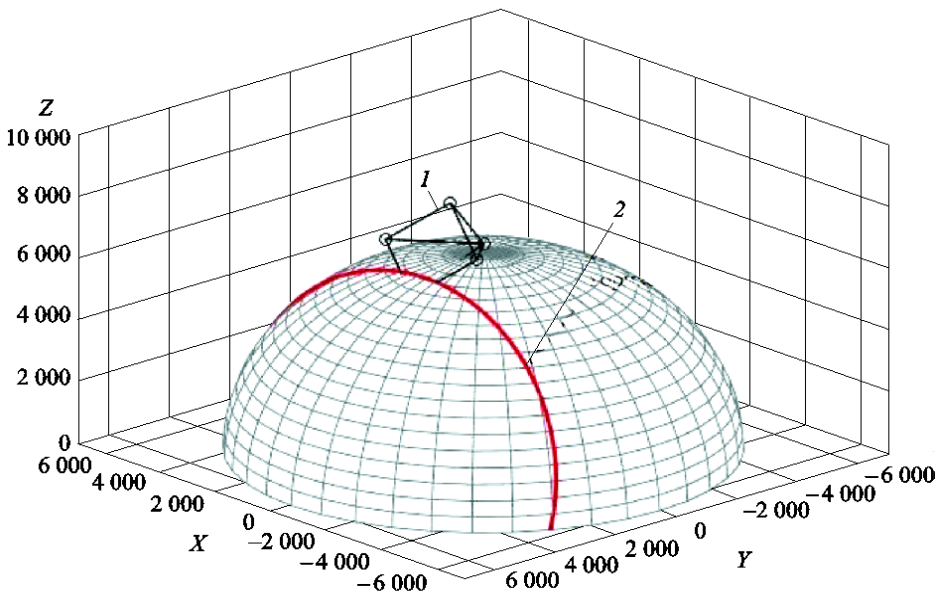


Рис. 5. Результат моделирования

По модели численно была определена область применимости видеокамеры с углом полураствора $\alpha = 28^\circ$, находящейся на высоте 300 км (рис. 6).

Две зоны максимума обусловлены тем, что горизонт Земли проходит по диагонали кадра.

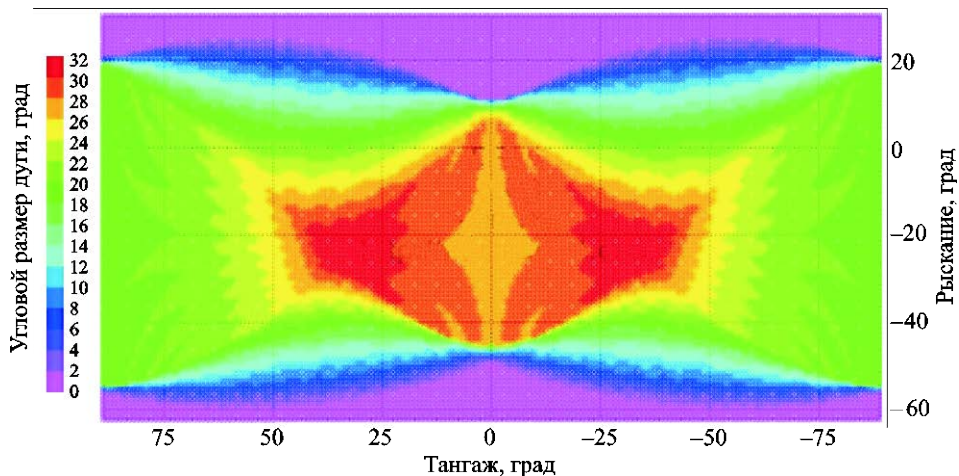


Рис. 6. Область применимости системы

Заключение. Для двух видеокамер область видимости представлена пересечением двух подобных областей, одна из которых изображена на рис. 6, а вторая повернута на 90° по часовой стрелке относительно начала координат. Таким образом, алгоритм имеет широкую область применения, его можно использовать для определения ориентации наноспутника.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Волков В.Г., Ковалев А.В., Федчишин В.Г. Тепловизионные приборы нового поколения. *Специальная техника*, 2001, № 6, с. 16–21.
- [2] Волков В.Г., Ковалев А.В., Федчишин В.Г. Тепловизионные приборы нового поколения. *Специальная техника*, 2002, № 1, с. 18–24, 26.
- [3] *Canny edge detector*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Canny_edge_detector (дата обращения 20.01.2016).

Статья поступила в редакцию 30.05.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ломака И.А., Устюгов Е.В. Определение направления на местную вертикаль для наноспутника класса CubeSat по анализу изображений Земли. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 8.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-08-1520>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XL Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 26–29 января 2016 г.

Ломака Игорь Андреевич родился в 1993 г. Лаборант, магистрант кафедры «Космические исследования» им. академика С.П. Королёва. e-mail: igorlomaka63@gmail.com

Устюгов Ефим Владимирович родился в 1989 г., окончил СНИУ им. академика С.П. Королёва в 2012 г. Аспирант, ассистент кафедры «Космических исследований» СНИУ им. академика С.П. Королева. Автор более 10 научных работ в области видеонавигации и проектирования наноспутников. e-mail: efim163@gmail.com

Determining the local vertical line direction for CubeSat class nano-satellite by the Earth images analysis

© I.A. Lomaka, E.V. Ustyugov

Samara State University, 443086, Russia

The study deals with applying video images to determine the local vertical line of a nano-satellite. In the research we develop algorithms for solving the task and present the basic formula, the result of numerical experiment. Finally, we make the conclusions concerning the systems application.

Keywords: *nano-satellite, the local vertical, videonavigation, motion model, orientation.*

REFERENCES

- [1] Volkov V.G., Kovalev A.V., Fedchishin V.G. *Spetsialnaya tekhnika — Special machinery*, 2001, no. 6, pp. 16–21.
- [2] Volkov V.G., Kovalev A.V., Fedchishin V.G. *Spetsialnaya tekhnika — Special machinery*, 2002, no. 1, pp. 18–24, 26.
- [3] *Canny edge detector*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Canny_edge_detector (accessed January 20, 2016).

Lomaka I.A. (b. 1993), Master degree student of the Department of Space Research, Samara State University. e-mail: igorlomaka63@gmail.com

Ustyugov E.V. (b. 1989), post-graduate student, assistant of the Department of Space Research, Samara University. Author of over 10 scientific papers in the field of video-navigation and nano-satellite design. e-mail: efim163@gmail.com